引用格式：宋永华, 张洪财, 陈戈. 智慧城市能源系统迈向碳中和的典型路径研究——以澳门特别行政区为例. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): xxxx-xxxx.
Song Y H, Zhang H C, Chen G. Typical pathway to carbon neutrality for urban smart energy systems—Case study of Macao Special Administrative Region. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): xxxx-xxxx. (in Chinese)

# 智慧城市能源系统迈向碳中和的典型路径研究

## ——以澳门特别行政区为例



宋永华　张洪财　陈　戈*

澳门大学 智慧城市物联网国家重点实验室 澳门 999078

**摘要**　“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”这一国家战略目标，不仅体现了我国作为世界大国的担当，也符合我国经济产业结构转型的需要。城市在我国人口、能源消耗、碳排放中均占据主导地位，是我国实现碳达峰、碳中和的主战场。文章首先指出城市能源系统在推进国家“双碳”目标中的重要角色及其面临的重要挑战。然后，以澳门为例分析城市能源消费、碳排放的基本特征。最后，提出“推广需求侧管理为主、利用分布式清洁能源为辅、主动外购绿电为补充、发展智能化技术为支撑”的城市实现碳中和的技术路径，为推动我国城市碳中和进程提供参考依据。

**关键词**　碳达峰，碳中和，城市能源系统，发展路径

**DOI**　10.16418/j.issn.1000-3045.20220125004

近年来，应对温室气体排放所带来的气候变化，已成为各国关注的焦点。2020年9月，国家主席习近平在第75届联合国大会一般性辩论上庄严承诺中国“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”（即“双碳”目标），不仅体现了我国作为世界大国的担当，同时也符合我国经济产业结构转型的需要。为具体推动“双碳”目标的落实，2020年底，习近平总书记在中央经济工作会议提出，要抓紧制定2030年前碳排放达峰行动方案，支持有条件的地方率先达峰；2021年《政府工作报告》中提出，在“十四五”期间，单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放要分别降低13.5%和18%。

城市作为人类经济生产活动的集中区域与能源消耗的主体，在实现“双碳”目标中有着举足轻重的

*通信作者
资助项目：澳门科学技术发展基金重点研发专项（0003/2020/AKP）
修改稿收到日期：2022年3月13日；预出版日期：2022年7月1日

地位。部分学者对此开展了一定的研究。例如：分析深圳能耗与碳排放的特点与发展趋势，并与国内外其他城市进行对比，指出了深圳实现碳中和所面临的挑战[1]；分析长三角区域内主要城市碳排放特点，为无锡市实现“双碳”目标提出建议[2]；总结国外不同城市碳中和政策，为我国城市碳中和提出政策性建议[3]。实现城市的碳中和，是一个长期的、系统性的复杂目标，必须提前做好完善的技术路径规划。然而，目前与城市相关的研究多为政策性综述为主，关于具体技术路径的研究较少。

本文将研究城市能源系统碳中和的技术路径问题，为推动我国城市碳中和进程提供参考依据。首先，本文分析了城市能源系统的特点，探讨城市实现碳中和的具体挑战；然后，以澳门特别行政区（简称“澳门”）为例分析城市能源消耗与碳排放结构的特点与发展趋势；最后，提出针对城市实现碳中和的智慧化技术路径。

## 1 城市是实现碳中和目标的主战场

城市是人类经济生产活动的主要聚集地，在全球能源消耗、碳排放等方面均占据主导地位。在我国，城市容纳了64%的人口①，消耗了85%的能源[4]，贡献了约85%碳排放[5,6]。未来，伴随着中国城市化进一步发展，这一比例将进一步扩大。因此，城市毫无疑问是我国实现“双碳”目标的主战场。

设计城市能源系统实现碳中和的技术路径必须考虑城市在能源系统中的特点，主要包括：① 城市为能源系统的需求侧；② 城市用地规划较为紧张；③ 外购电力在城市能源消费中占比明显。这对城市实现碳中和带来巨大挑战和更高要求，主要包括以下3个方面。

（1）设计城市的碳中和路径，要求着重考虑针对需求侧的节能减排技术。大部分城市作为生产活动的中心，在国家的整个能源体系中，属于需求侧[7]。一般而言，需求侧的能源消费量远高于生产量；因此，与能源的“开源”相比，“节流”显得更为关键。同时，城市内能源消费的形式多种多样且一般包含大量灵活性资源。因此，采用城市不同领域能源消费的技术革新，结合先进的需求侧资源调度方法，可促进城市碳中和的实现。

（2）设计城市的碳中和路径，应注重发展分布式新能源。对于许多高人口密度都市（如澳门）而言，城市用地规划较为紧张。因此，一般没有足够的空间建立大规模、集中式的新能源发电站。考虑到城市楼宇众多，具备发展屋顶光伏等分布式新能源的有利条件[8]。然而，分布式新能源一般在空间上较为分散，实现协同优化运行的难度较大。因此，设计城市的碳中和路径，应在考虑推广分布式新能源的同时，着重辅以高效的运行控制手段，实现分布式新能源的就地高效消纳，从而降低本地电力生产的碳排放。

（3）设计城市碳中和的路径，必须将外购电力等的间接碳排放纳入考虑，实现真正意义的碳中和。城市大量外购以电力为主的二次能源，虽然不造成本地直接碳排放，但是如果所购买电力源自化石能源燃烧，则也将造成电力生产地的碳排放。如果一座城市只关注自身化石能源消费带来的直接碳排放，而忽略因为外购电力等造成的间接碳排放，则显然无法达到名副其实的碳中和，也不利于国家“双碳”目标的实现。

## 2 澳门城市能源消费与碳排放分析

澳门是粤港澳大湾区的中心城市之一，澳门特区政府积极响应国家“双碳”目标。在2021年7月举行的第12届国际基础设施投资与建设高峰论坛上，澳门特别行政区首席长官贺一诚强调：“澳门将认真做好

① 国家统计局．第七次全国人口普查公报（第七号）．(2021-05-11)[2022-04-19]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202105/t20210510_1817183.html.

碳达峰、碳中和的工作”；特区政府在2022年施政报告中指出要积极配合国家环保总体战略，制订长期减排策略。本文后续章节，以澳门为例分析城市能源消费与碳排放的特点，并设计相应的碳中和路径。澳门是一个高度发展的沿海小微城市，在我国东南沿海经济发达区域（特别是以旅游业等第三产业为主的城市中）具有一定的代表性，相关研究成果对其他相似城市也具有重要的借鉴意义。

## 2.1 澳门经济与能源消费总览

由于澳门在2020与2021年受新冠肺炎疫情影响严重，其经济能耗数据不具备代表性。因此，本文将主要以2019年的经济能耗数据进行分析。澳门总面积32.9平方公里，总人口约68万，其每平方公里平均人口超过2万，人均国内生产总值（GDP）高达54万元人民币（2019年），是世界上人口密度最高、人均GDP最高的地区之一。澳门的经济结构具有以第三产业为主体的发达城市的典型特征：在2019年，第三产业贡献了超过95%的GDP；而第二产业占比不足5%（图1）。

回归20多年以来，澳门经济取得了高速发展，但其单位GDP能耗呈逐年下降趋势（图2）；同时，澳门的人均能耗显著低于世界主要经济体，甚至低于我国平均水平（图3）。澳门整体单位能效较高，其经济增长不完全依赖于能耗增长，这为澳门率先实现碳中和提供了良好的基础条件。

然而，由于澳门人口密度较高，其单位面积能耗较大。例如，澳门单位面积年用电量达1.686 6亿千瓦时/平方公里，约为深圳的3倍，香港的4倍（图4）。因此，澳门仍然面临着巨大的节能减排压力。

## 2.2 澳门能耗消费结构分析

澳门能源消费以电力为主（图5）。在2019年，电力消费占全澳能源消费总量的56.13%。此外，轻柴油、车用汽油等交通能源消费占比明显，分别达到11.01%和9.70%；天然气消耗占比

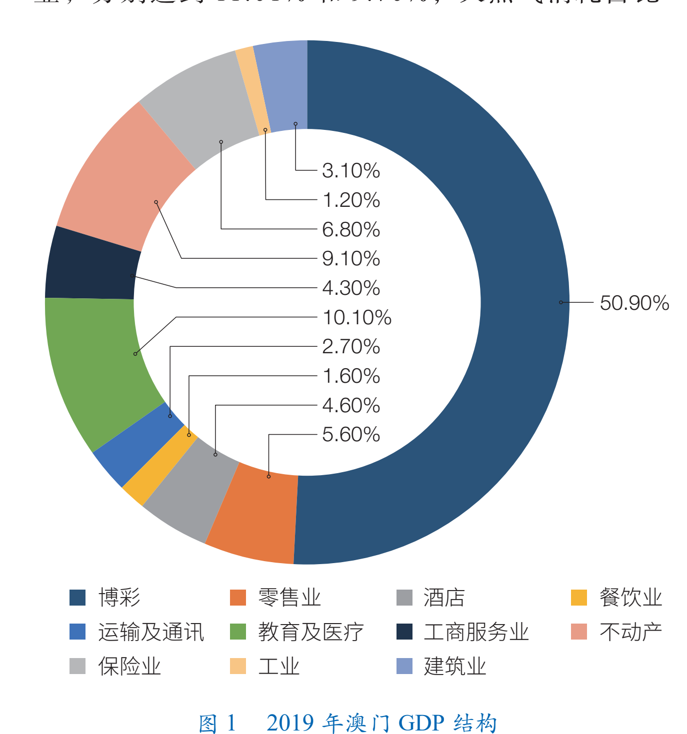



图1 2019年澳门GDP结构

Figure 1 GDP structure of Macao, China in 2019

数据来源：澳门特别行政区统计暨普查局（https://www.dsec.gov.mo/getAttachment/e8e1fdd9-3482-425f-b696-be5d3fdcbe84/C_PIBP_FR_2019_Y.aspx）

Data source: Government of Macao Special Administrative Region Statistics and Census Service (https://www.dsec.gov.mo/getAttachment/e8e1fdd9-3482-425f-b696-be5d3fdcbe84/C_PIBP_FR_2019_Y.aspx)

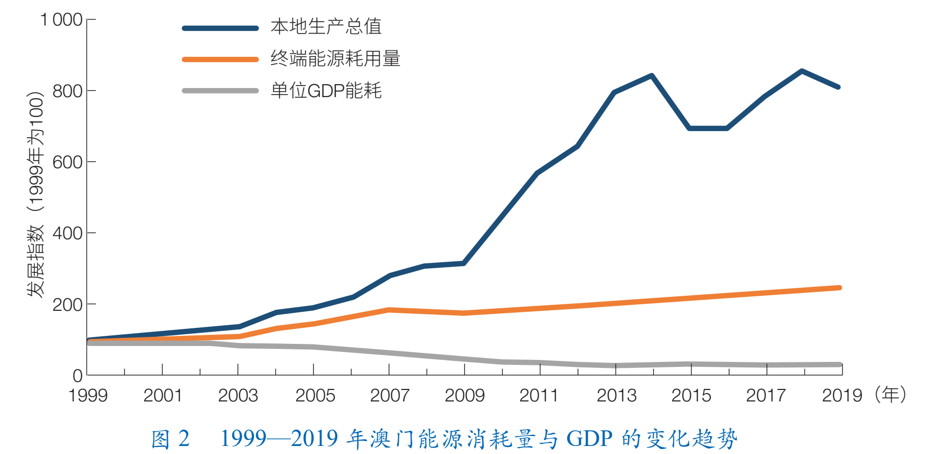



图2 1999—2019年澳门能源消耗量与GDP的变化趋势

Figure 2 Trends in energy consumption and GDP in Macao, China form 1999 to 2019

数据来源：澳门特别行政区统计暨普查局（https://www.dsec.gov.mo/zh-MO/Statistic?id=903）

Data source: Government of Macao Special Administrative Region Statistics and Census Service (https://www.dsec.gov.mo/zh-MO/Statistic?id=903)

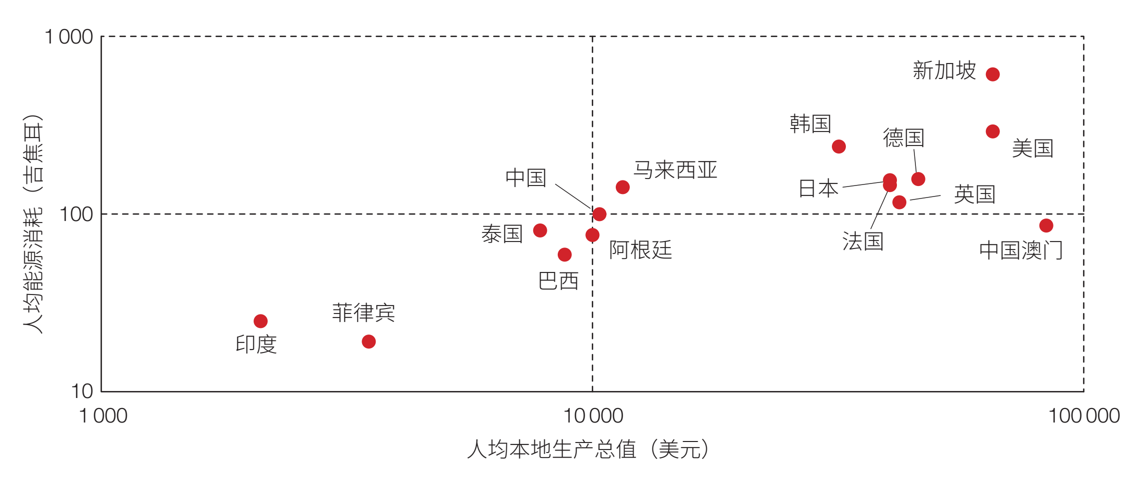



图 3　2019 年澳门与世界主要经济体人均能耗与人均本地生产总值的比较

Figure 3　Macao’s energy consumption per capita versus GDP per capita in 2019

数据来源：Our World in Data（https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use）

Data source: Our World in Data（https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use）

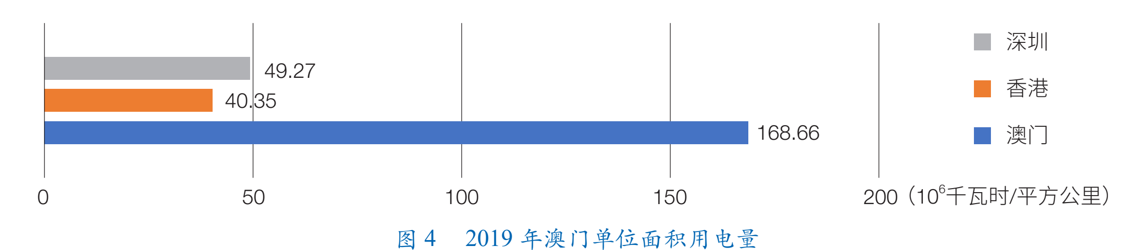



图 4　2019 年澳门单位面积用电量

Figure 4　Annual electricity consumption per unit area in Macao, China in 2019

数据来源：澳门特别行政区统计暨普查（https://www.dsec.gov.mo/TimeSeriesDatabase.aspx?KeyIndicatorID=83）

Data source: Government of Macao Special Administrative Region Statistics and Census Service (https://www.dsec.gov.mo/TimeSeriesDatabase.aspx?KeyIndicatorID=83)

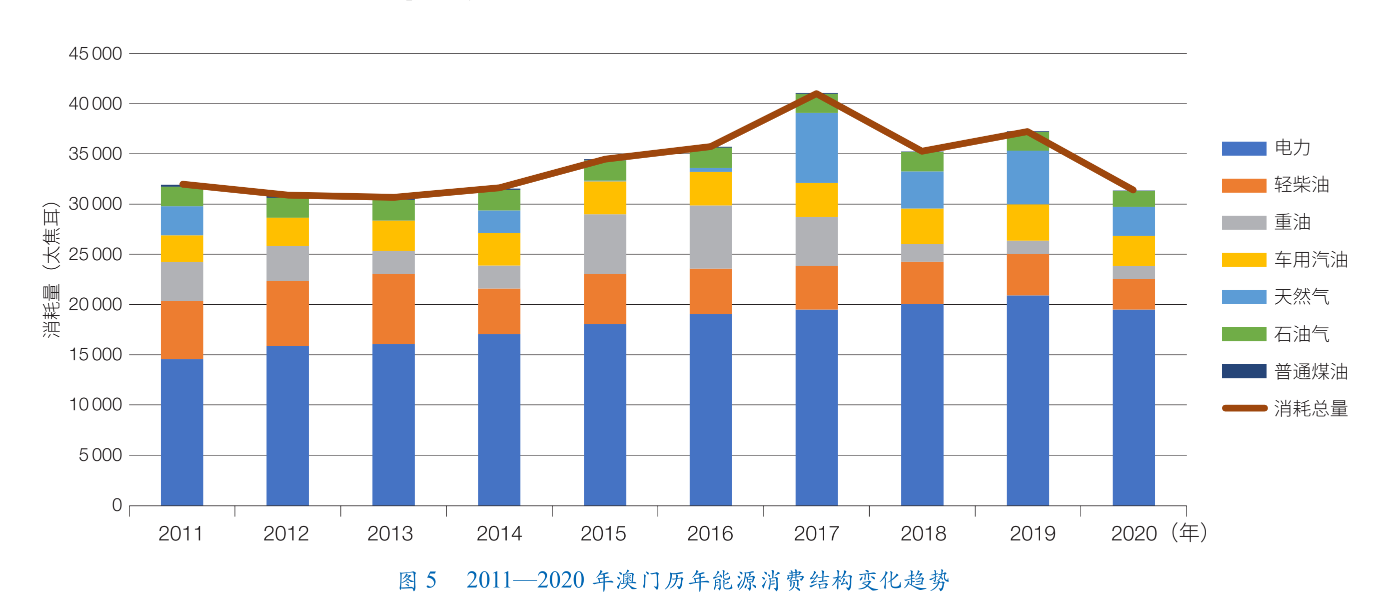



图 5　2011—2020 年澳门历年能源消费结构变化趋势

Figure 5　Energy consumption structure in Macao, China from 2011 to 2020

数据来源：澳门特别行政区统计暨普查局（https://www.dsec.gov.mo/zh-MO/Statistic?id=809）

Data source: Government of Macao Special Administrative Region Statistics and Census Service (https://www.dsec.gov.mo/zh-MO/Statistic?id=809)

达14.33%，多用于本地发电。

澳门的电力来源以外购电力为主，占比超过90%；其他由本地燃油、天然气、垃圾焚化发电组成（图6）。大量的外购电力将城市碳排放转移到了城市外部。

图7展示了2019年澳门电力消费结构。其中，商业电力消费占比为73%（主要为商业楼宇消费），住户和政府机构耗电占比分别为16.4%和6.8%。显然，非居民建筑（包括商业建筑和政府建筑）的电力消耗，占据总电力消耗的绝大部分。

## 2.3 澳门能源系统碳排放结构分析

本文聚焦于城市能源系统迈向碳中和的技术路径，因此仅考虑与能源相关的碳排放。澳门的能源碳排放可分为2个最主要范畴：范畴1，代表本地化石能源燃烧造成的本地直接碳排放；范畴2，代表由外购电力所造成的间接碳排放[9]。

过去10年，范畴1本地直接碳排放量为100—200万吨/年，其主要来源为本地发电、海陆运输、商业家庭及服务业（图8）。其中，本地发电产生本地直接碳排放的30%—40%，占主导地位。范畴1的碳排放量已在2017年达到顶峰，此后振荡下降。这说明澳门范畴1的碳排放量已经提前达峰。

近年来，范畴2间接碳排放量约为400—500万吨/年（根据澳门外购电量与南方电网碳排放因子估算），相当于范畴1本地直接碳排放量的3—4倍。由于外购电力不断增加，其总量仍呈逐年上升趋势（图9）。

## 2.4 澳门能耗与碳排放结构总结

澳门能耗与碳排放结构的特点总结如图10所示。

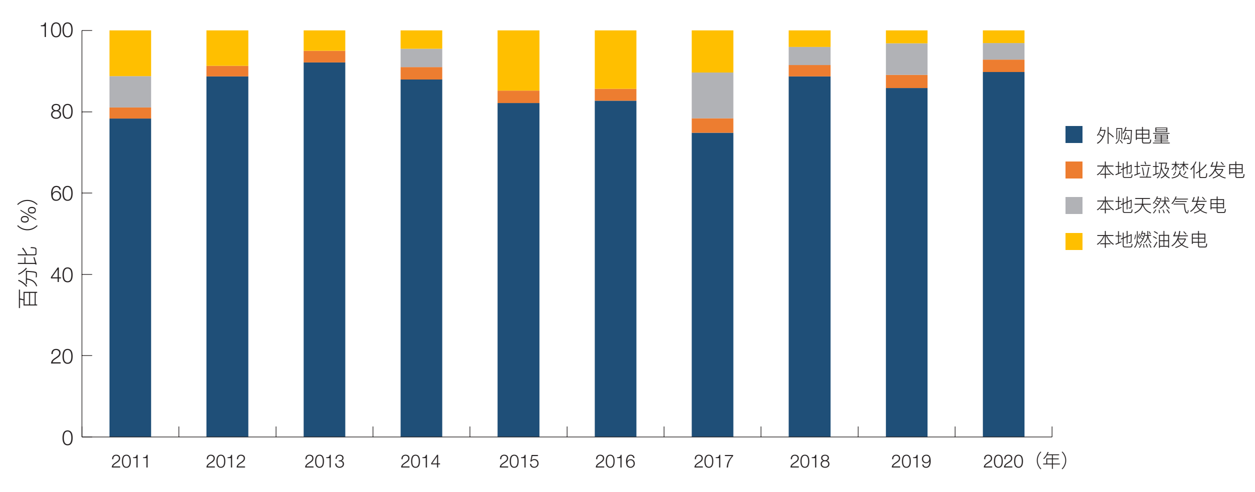



图6　2011—2020年澳门电力来源结构

Figure 6　Power settlement in Macao, China from 2011 to 2020

数据来源：澳门特别行政区环境保护局（https://www.dspa.gov.mo/Publications/StateReport/2020/2020_tc.pdf）

Data source: Government of Macao Special Administrative Region Environmental Protection Bureau (https://www.dspa.gov.mo/Publications/StateReport/2020/2020_tc.pdf)

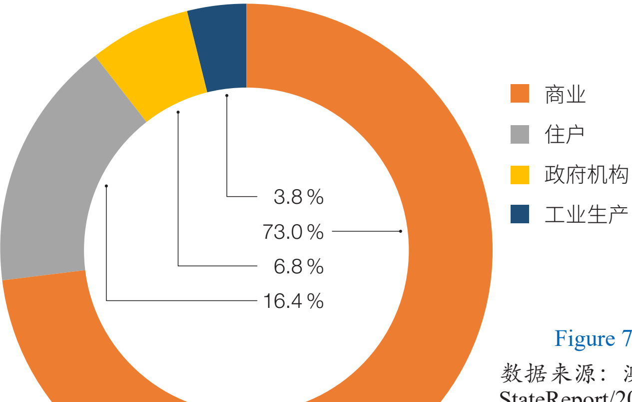



图7　2019年澳门电力消费结构

Figure 7　Energy consumption in different fields in Macao, China in 2019

数据来源：澳门特别行政区环境保护局（https://www.dspa.gov.mo/Publications/StateReport/2020/2020_tc.pdf）

Data source: Government of Macao Special Administrative Region Environmental Protection Bureau (https://www.dspa.gov.mo/Publications/StateReport/2020/2020_tc.pdf)

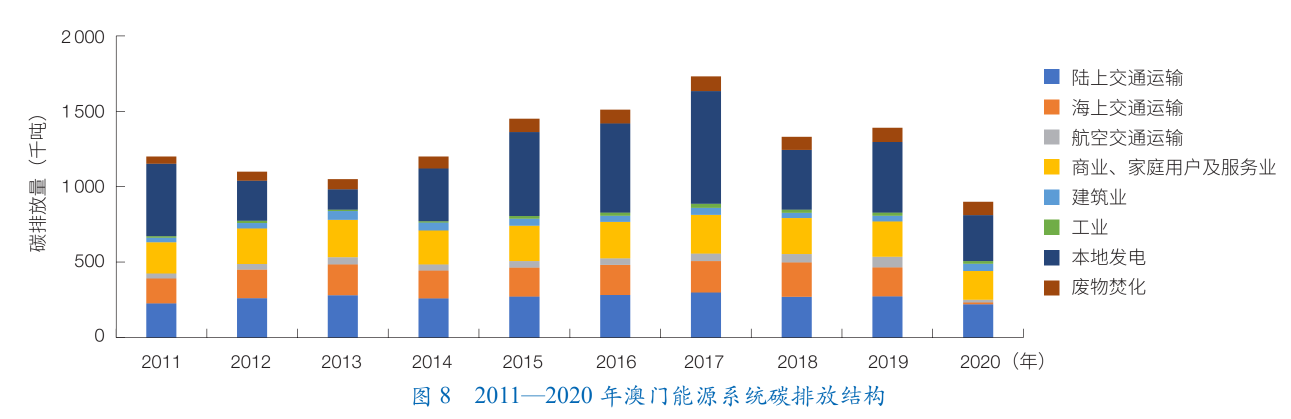



图 8　2011—2020 年澳门能源系统碳排放结构

Figure 8　Structure of carbon emissions of energy systems in Macao, China from 2011 to 2020

数据来源：澳门特别行政区环境保护局（https://www.dspa.gov.mo/Publications/StateReport/2020/2020_tc.pdf）

Data source: Government of Macao Special Administrative Region Environmental Protection Bureau (https://www.dspa.gov.mo/Publications/StateReport/2020/2020_tc.pdf)

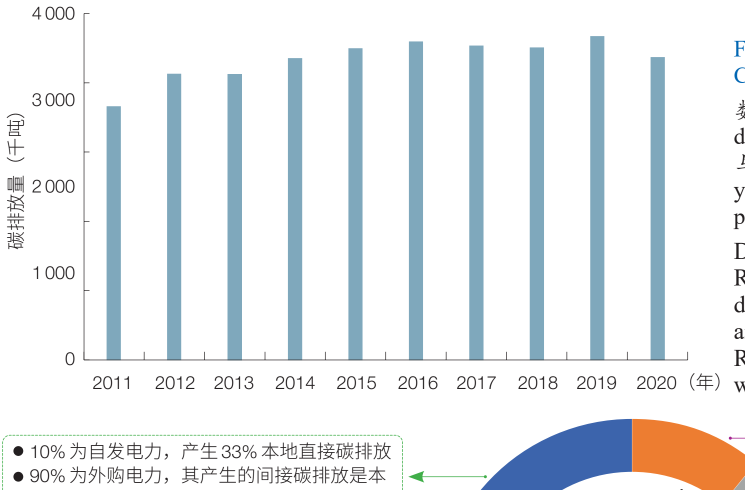



图 9　2011—2020 年澳门外购电力所造成的碳排放

Figure 9　$CO_2$ emission of outsourcing electricity in Macao, China from 2011 to 2020

数据来源：澳门特别行政区环境保护局（https://www.dspa.gov.mo/Publications/StateReport/2020/2020_tc.pdf）与中华人民共和国生态环境部（https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/W020201229610353340851.pdf）

Data source: Government of Macao Special Administrative Region Environmental Protection Bureau (https://www.dspa.gov.mo/Publications/StateReport/2020/2020_tc.pdf) and Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/W020201229610353340851.pdf)

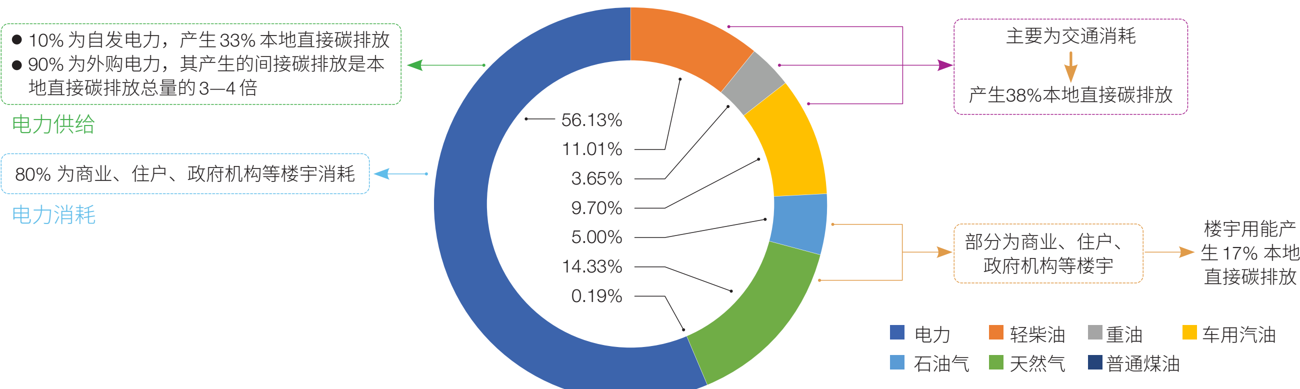



图 10　2019 年澳门能耗结构与主要碳排放来源

Figure 10　Summery of energy consumption and carbon emissions in Macao, China in 2019

电力消费占澳门总能源消费比重超过一半；其中，10% 的电力源自本地，带来了约 33% 的本地直接碳排放；余下 90% 的电力为外购电力，带来了相当于本地直接碳排放 3—4 倍的外部间接碳排放。澳门 80% 以上的电力、部分液化石油气和天然气被大型建筑消耗，产生了约 17% 的本地直接碳排放，并带来 80% 以上的间接碳排放。轻柴油、重油、车用汽油等主要被交通行业消耗，产生了约 38% 的本地直接碳排放。上述特点说明实现澳门碳中和必须从本地发电、外购电力、建筑、交通等关键方面着手。

## 3 澳门能源系统实现碳中和的路径

本章考虑城市属于能源系统需求侧、用地资源紧张、外购电力占比高的特点，并结合澳门的实际情况，设计相应的碳中和技术路径。

### 3.1 针对范畴 1 碳排放的减排技术路径

#### 3.1.1 分布式清洁能源利用

屋顶光伏是一种成熟的分布式新能源，在推动城市碳中和方面有着可观的发展潜力[10,11]。澳门可利用丰富的屋顶资源，大力推广屋顶分布式光伏。根据测算，澳门屋顶总面积约为 5.3 平方公里，全年光伏有效利用小时数约为 1 150 小时。Melius 等[12]认为，大约 60%—65% 的商业楼宇屋顶和 22%—27% 的住宅屋顶适合发展屋顶光伏。假设澳门有约 20% 的屋顶面积安装光伏板，发电量将达到约 1.22 亿千瓦时，可减少约 22.6% 的本地发电所带来的直接碳排放量。此外，薄膜式太阳能电池可贴合在建筑墙体表面进行光电转化，且光电转化效率最高可达 22%[13,14]。澳门高层商业建筑密集，墙体表面积较大。推广薄膜太阳能电池，有着可观的发展潜力。

#### 3.1.2 陆上交通电气化

目前，澳门的机动车辆绝大部分为燃油车，电动车普及率不足 1%（图 11）。在澳门推广陆上交通电气化，可大幅减少化石燃料燃烧，实现节能减排。国内外学者的研究也证实了陆上交通电气化对于碳中和的显著作用。例如，研究指出若我国采用电动车全面替代燃油车，则可减少 16% 的碳排放量[15]；还有研究分析认为美国加州采用电气化可降低 20.3% 的碳排放量，并提升新能源的消纳能力[16]。参考香港在 2021 年发布的电动车普及化路线图②，假设澳门在 2035 年前后禁售燃油车（与香港一致），则澳门预计在 2050 年前后将实现陆上交通电气化（图 12），可减少本地直接碳排放总量约 19%。

陆上交通电气化将使得未来电网与交通网紧密耦

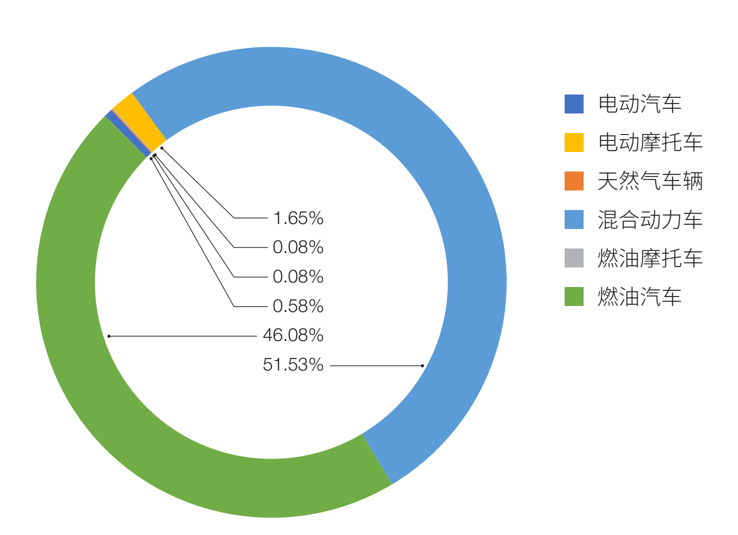



图 11　2020 年澳门机动车辆类型分布

Figure 11　Motor vehicles by energy source in Macao, China in 2020

数据来源：澳门特别行政区交通事务局（https://www.dsat.gov.mo/pdf/statistics/2020/2/tc/4.pdf）

Data source: Government of Macao Special Administrative Region Transport Bureau (https://www.dsat.gov.mo/pdf/statistics/2020/2/tc/4.pdf)

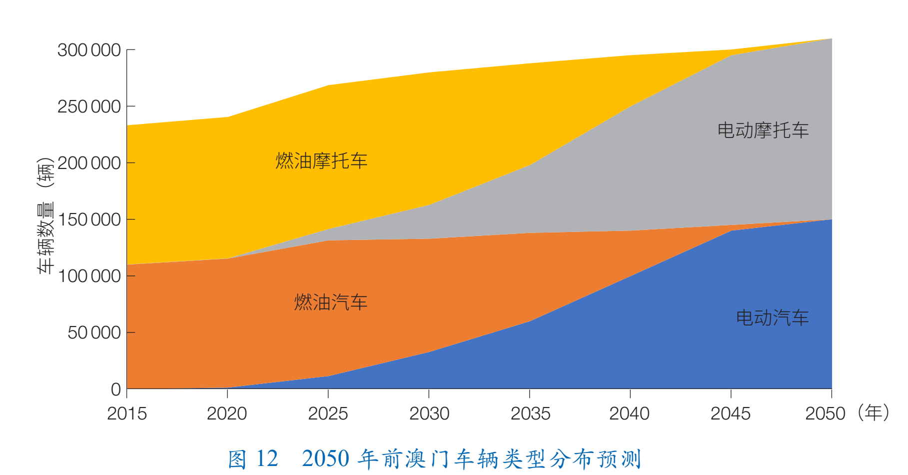



图 12　2050 年前澳门车辆类型分布预测

Figure 12　Development forecast of motor vehicles in Macao, China till 2050

② 香港政府新闻网．首份电动车普及化路线图公布．(2021-03-17)[2022-04-20]. https://www.news.gov.hk/chi/2021/03/20210317/20210317_142452_434.html.

合[17]，这极大地增加了未来城市电网与交通网络的管理难度[18,19]。未来城市应该在考虑“电网—交通网”耦合约束的前提下，优化电动车及其充电设施的建设与运行，减低甚至避免交通电气化对耦合网络带来的负面影响；进一步，以具备“移动储能”特性的电动车为媒介，实现“电网—交通网”耦合网络的联合优化，实现耦合网络的良性协同。

#### 3.1.3 推广氢动力海上交通

作为一个港口城市，海上交通所带来的碳排放约占澳门本地直接碳排放量的15%。近年来，氢动力技术在货船运行中已取得了长足的发展[20]。一方面，氢气可以经加压液化后实现高密度的能量存储，满足海上交通长距离、大运量的要求，因此在海上交通中具有广阔的应用前景。在2018年，全球已有超过60万台燃料电池应用在船舶或相关的海洋应用中[21]。假设澳门于2030年开始逐渐引进并推广氢动力船舶，则可减少本地直接碳排放总量约13%。另一方面，氢气通过燃料电池技术提供动力后，将转化为水，不产生任何直接碳排放；而氢气可由近海风电场等新能源发电通过电解制备，从而不产生间接碳排放[22,23]。因此，澳门可大力引进并推广氢动力船舶，以实现海上交通零碳化。

#### 3.1.4 发展低碳/零碳建筑

由于澳门的商业、公共、居民等建筑等消耗了相当比例的化石能源和大部分电力，发展低碳甚至零碳建筑，也是澳门实现碳中和的关键之一。一方面，应大力推动建筑电气化改造，减少建筑的化石能源消费；另一方面，应大力发展智慧楼宇能量管理，实现楼宇负荷的最优控制，降低总电耗，减小间接碳排放。例如，利用建筑本身的储热/储冷能力，可实现楼宇负荷的削峰填谷，提高楼宇综合能效[24,25]；采用电气化、智慧楼宇能量管理等新技术，可实现楼宇零碳排放[26]。发展低碳/零碳建筑在未来可减少澳门本地直接碳排放总量约17%。

#### 3.1.5 城市配电网智能化改造

交通与建筑等的电气化改造，将进一步增大澳门的电力负荷需求，这将对配电网的供电能力提出更高要求。然而，澳门建筑极端密集，老旧建筑较多，升级配电网的难度较大且成本昂贵。因此，澳门一方面要大力推广新型交直流混合配电技术，在相同配电建设条件下，大幅提升配电网的供电能力[27]；另一方面，可利用分布式储能、柔性负荷等技术，实现负荷削峰填谷，延缓配电网的升级改造需求[28]。

### 3.2 针对范畴2间接碳排放的技术路径

#### 3.2.1 绿电交易

为减少甚至消除城市范畴2间接碳排放，必须实现外购电力的零碳化，即要求澳门外购的电力主要来自风能、光伏等零碳排放的绿色能源。以经济手段激励城市电力用户积极参与外部电网的绿电交易，促进用户从城市外部购买绿色电力，是实现这一目标的重要手段。近年来，绿电交易已在我国逐步开展试点。在2021年9月7日，南方电网与国家电网联合组织召开了绿电交易试点启动会，来自17个省份的259家市场主体完成了79.35亿千瓦时绿电交易。预计将减少标煤燃烧243.60万吨，减排二氧化碳607.18万吨。

为了更好地实现绿电交易，澳门需要与南方电网携手，大力开展3方面技术研究。① 大用户绿电直购机制。企业等大用户是电力消耗的主体。因此，在目前电力交易尚未充分市场化的阶段，根据不同大用户的用能特性，设计独特的绿电协议电价与直购机制，不仅可保证大用户的用电安全与购电经济性，同时可促进绿电交易的开展[29]。澳门目前通过与南方电网协议购电方式，购买内地电力，在未来也可以作为一个大用户，参与绿电直购。② 绿电交易定价机制。定价机制是绿电交易的核心。针对未来电力市场逐渐成熟的场景，合理的定价机制能够促进绿电交易各方的积极性与绿色电力的消纳。目前，已有许多针对一般电力交易的定价机制的研究工作[30,31]。然而，针对绿电交

易的定价机制研究较为少见。③ 绿色电力消费认证技术。绿电交易的过程中需要提供绿电认证以证明绿电消费的有效性。由于绿电消费过程涉及电网、监审机构、发/用电企业、交易平台等主体，各主体均具有对绿电认证状态进行实时查询和异步更新的需求，这为绿电认证状态的真实性和一致性带来了挑战。利用区块链技术去中心化、高度自治、不可篡改的特点，将绿电认证的核发、转移、核销过程记录在区块链上，可建立安全、可信、鲁棒的分布式绿电认证账本[32]。

### 3.2.2 电力市场辅助服务

由于部分城市中经济生产活动的特殊性质（如航空业），以目前的技术条件而言，尚无法完全消除其对应的碳排放。因此，城市同样需要提供一定量的碳汇资源，以实现碳中和。常见的碳汇资源包括绿色植被、碳捕集与封存技术等。然而，考虑到澳门城市用地紧张的特点，种植绿色植被、发展碳捕集与封存技术的应用空间较小，无法大量稳定提供碳汇资源。同时，澳门 80% 的电力都被楼宇建筑消耗，其中有相当一部分负荷（如暖通空调设备、储能、电动车等）属于柔性可控负荷，可为电网提供灵活性资源，从而满足城市碳汇资源需求（图 13）。

近年来，需求侧灵活资源的利用成为研究的热点。例如，Kohlhepp 等[33]总结了暖通空调作为灵活性资源参与辅助服务的优势与挑战，并详细地介绍了世界范围内 16 个不同的相关应用实例；Hu 等[34]总结了城市居民区内潜在的灵活性资源，并详细地回顾了相关的优化调度方法；Gjorgievski 等[35]基于 34 个实际案例指出需求侧的电热转化系统可为电网提供可观的灵活性。由此，在未来澳门深度融入广东电力市场的场景下，澳门可积极发展城市灵活性资源聚合与优化调度控制技术，为电网提供需求侧响应、备用、调频等辅助服务，促进风光等新能源的消纳。参考浙江省灵活性资源参与辅助服务的实例，每 1 兆瓦灵活性资源可提供约 225 吨/年的二氧化碳碳汇资源③；假设澳门 40% 楼宇负荷（主要为具备灵活性的空调负荷）参与辅助服务，则可提供约 4.32 万吨/年的碳汇资源。

## 3.3 碳中和技术路径的智慧能源支撑技术

虽然本文 3.1 和 3.2 节中探讨的重要技术与方法对

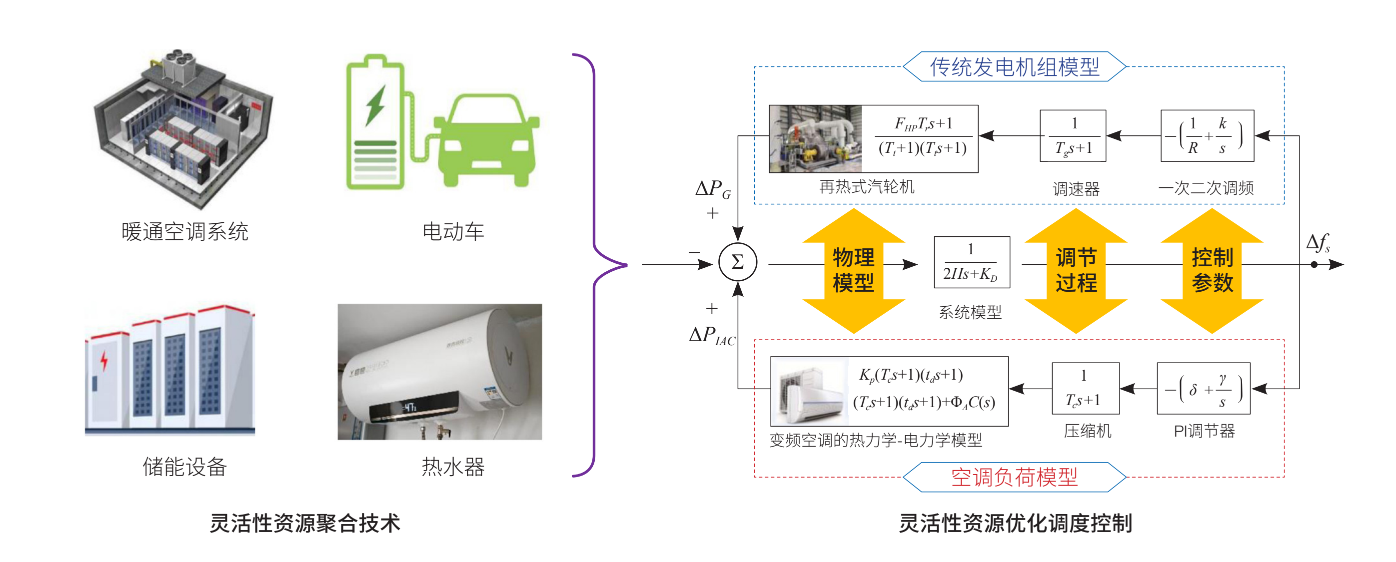



图 13　灵活性资源聚合与优化调控技术
Figure 13　Aggregation and optimization of flexibility resources

③ 北极星售电网．新型电力系统目标下负荷侧资源开启备用辅助服务交易市场．(2021-08-19)[2022-04-19]. https://shoudian.bjx.com.cn/html/20210819/1170947.shtml.

实现城市碳中和发挥着不可或缺的作用，但也为未来城市能源系统构建带来巨大挑战。例如，高比例分布式清洁能源具有的间歇性和不确定性，电动车和楼宇空调等需求侧柔性可控负荷单体容量小、规模庞大、行为随机，电气化交通网络及“电—氢—热”等多能耦合模块含有复杂的耦合网络约束，以及新型电力系统引入大量非线性的电力电子单元，都对城市综合能源系统的规划、运行与控制提出了更高的要求。传统能源系统相关理论与技术面临显著局限性，难以满足当下需求。

因此，为科学构建城市实现碳中和的技术路径，必须依靠以“物联网、大数据、人工智能”等深度应用为特征的智慧能源技术作为基础支撑。例如，利用能源物联网技术推动城市综合能源系统的信息化和数字化，实现能源生产、运输、存储、转换、消费各环节的全域精细化态势感知，为综合能源系统的建模、运行、控制等提供基础；利用大数据挖掘技术，可发挥海量、多源、多维大数据的价值，实现能源系统精准的用户画像绘制和供需预测等，为能源系统的科学规划和运行维护提供依据；利用人工智能技术，实现复杂能源系统运行优化与在线控制，促进多类型灵活资源互补互济，提升系统综合运行效率，进而支撑碳中和目标实现。

## 3.4 澳门碳排放预测

### 3.4.1 本地直接碳排放（范畴1）

以图8中2015—2020年澳门本地碳排放为基础，本节对澳门2021—2060年碳排放进行趋势预测。该预测基于以下假设：① 参考中国香港在2021年发布的电动车普及化路线图②，假设设澳门在2035年禁售燃油车。② 研究表明在2018年全球已有超过60万台燃料电池应用在船舶或相关的海洋应用中[21]。假设从2030年开始，在澳门氢动力船舶逐渐替代燃油燃气船舶。③ 假设澳门从今年开始大力推广屋顶光伏。同时，薄膜太阳能电池的世界总产能在2015年已达11.7吉瓦并增长迅速[36]。因此，本文假设薄膜太阳能技术将从2025年开始在澳门逐步应用。④ 假设澳门楼宇建筑等通过电气化与节能减排措施，可在现有基础上逐步实现楼宇零直接碳排放[26]。⑤ 假设从2025年开始，澳门开始作为一个整体参与广东电力市场辅助服务市场，参与服务的负荷由零逐渐上升到当前楼宇负荷的40%。参考浙江178.1兆瓦灵活性资源减少3日总碳排放330吨，单位可控负荷年均碳减排量为225吨/兆瓦。

根据上述假设，澳门2021—2060年的本地直接碳排放预测如图14所示。自2017年碳达峰之后，澳门碳排放量在2017—2019年呈下降趋势。2020年

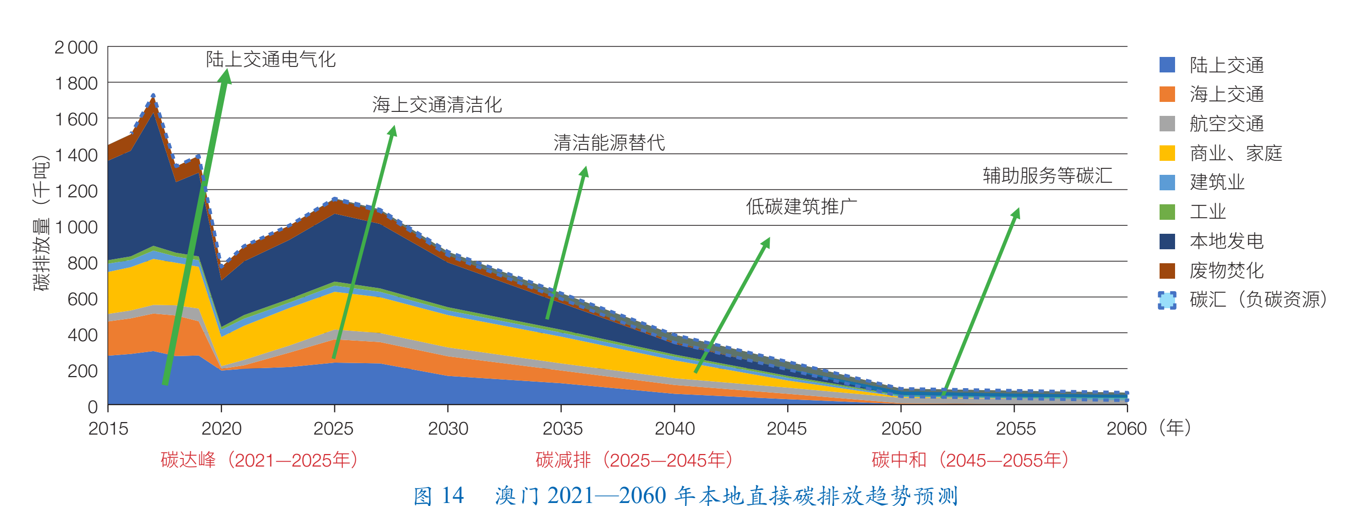



图14 澳门2021—2060年本地直接碳排放趋势预测
Figure 14 Prediction of the carbon emission in Macao, China from 2021 to 2060

与2021年受到新冠肺炎疫情的影响，澳门碳排放迅速下降。随后，在2021—2025年，由于疫情得到控制，澳门碳排放逐渐上升，并再次达到峰值，但其碳排放水平的新峰值将显著低于2019年。2025年开始，随着陆上交通电气化、海上交通氢动力化、本地清洁能源替代、低碳建筑推广等技术的推广，澳门本地直接碳排放逐年下降。同时，澳门电网作为一个整体，开始积极提供南方电网辅助服务，所带来的碳汇资源逐年上升。在2050年左右，澳门本地直接碳排放将与其所提供的碳汇资源相互抵消，实现本地的碳中和。

#### 3.4.2 外购电力间接碳排放（范畴2）

如本文3.2节所述，城市外购电力的碳中和依赖于城市与外部电网的协作。参考全球能源互联网发展合作组织在2021年4月发布的《中国2060年前碳中和研究报告》[37]，预计在2050年前中国电力系统将实现近零排放，在2055年左右实现碳中和。考虑到澳门特区政府可通过经济手段激励澳门电网从外部购买绿电，因此，我们预计澳门外购电力将先于2050年实现碳中和。

## 4 城市实现碳中和的路径总结

城市作为人类经济生产活动的主要聚集地，是能源消耗与碳排放的主体。因此，城市是实现国家“双碳”目标的主战场。本文以澳门为例，通过分析城市的经济、能耗与碳排放结构，提出城市能源系统的碳中和技术路径，为我国城市碳中和路径的设计提供参考。综合来看，实现城市能源系统碳中和的技术路径有4个方面。

（1）针对城市在整个能源系统中为用能需求侧。实现城市碳中和需要以需求侧管理为主，通过陆上交通电气化、海上交通氢动力化、建筑低碳化技术手段，降低城市的直接碳排放。

（2）针对城市用地资源紧张。需要有效利用城市建筑屋顶等空间资源，发展分布式光伏等清洁能源，实现本地发电的清洁替代，降低本地发电所带来的直接碳排放。

（3）针对城市大量消费的外购电力。城市需要通过积极参与绿电交易、提供电力市场辅助服务的方式，一方面主动消费绿色电力，另一方面为外部电网提供碳汇资源，促进城市在整个能源供应链中承担更重要责任，以实现城市真正意义上的碳中和。

（4）针对现代技术运用于城市能源系统综合管理。必须利用物联网、大数据与人工智能技术等实现城市综合能源系统的科学规划、运行与控制，以先进的智慧能源技术支撑各类城市碳中和技术的有效集成与应用。

### 参考文献


1 Wang, J J, Huang Y Y, Teng Y, et al. Can buildings sector achieve the carbon mitigation ambitious goal: Case study for a low-carbon demonstration city in China?. Environmental Impact Assessment Review, 2021, 90: 106633.

2 晏清, 朱玮. 长三角一体化发展背景下无锡市碳达峰碳中和实施路径研究. 江南论坛, 2021, (6): 7-9.
Yan Q, Zhu W. Pathway to carbon neutrality in Wuxi under the integration of Yangtze River. Jiangnan Forum, 2021, (6): 7-9. (in Chinese)

3 洪志超, 苏利阳. 国外城市碳中和策略及对我国的启示. 环境保护, 2021, 49(16): 68-71.
Hong Z C, Su L Y. The carbon neutral strategy of city in international and its implication to China. Environmental Protection, 2021, 49(16): 68-71. (in Chinese)

4 中国城市能源报告课题组. 中国城市能源报告（总体特征与样本发现2018）. 北京: 中国电力出版社, 2019.
Research Group of China Urban Energy. China Urban Energy Report (General Features and Sample Analysis 2018). Beijing: China Electric Power Press, 2019. (in Chinese)

5 Dhakal S. GHG emissions from urbanization and opportunities for urban carbon mitigation. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010, 2(4): 277-283.

6 Shan Y L, Guan D B, Hubacek D, et al. City-level climate

change mitigation in China. Science Advances, 2018, 4(6): eaaq0390.

7 Keirstead J M, Aruna S. A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 3847-3866.

8 Nikam V, Vaiju K. A review on control strategies for microgrids with distributed energy resources, energy storage systems, and electric vehicles. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(1): e12607.

9 宋庆彬, 汪中才. 澳门温室气体排放特征与减排策略研究. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(7): 18-26.
Song Q B, Wang Z C. Characterizing the urban GHG emissions and its reduction strategies in Macao. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(7): 18-26. (in Chinese)

10 Peng J Q, Lin L. Investigation on the development potential of rooftop PV system in Hong Kong and its environmental benefits. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 149-162.

11 Abreu J, Nathalie W, Natasha H. New trends in solar: A comparative study assessing the attitudes towards the adoption of rooftop PV. Energy Policy, 2019, 128: 347-363.

12 Melius J, Margolis R, Ong S. Estimating Rooftop Suitability for PV: A Review of Methods, Patents, and Validation Techniques. the United States: National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2013.

13 Powalla M, Paetel S, Ahlswede E, et al. Thin-film solar cells exceeding 22% solar cell efficiency: An overview on $CdTe^{-}$, Cu(In, $Ga)Se^{2-}$, and perovskite-based materials. Applied Physics Reviews, 2018, 5(4): 041602.

14 Cao Y, Zhu X, Chen H, et al. Towards high efficiency inverted $Sb_2Se_3$ thin film solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 200: 109945.

15 Peng W, Yang J, Lu X, et al. Potential co-benefits of electrification for air quality, health, and $CO_2$ mitigation in 2030 China. Applied Energy, 2018, 218: 511-519.

16 Ebrahimi S, Michael M K, Jack B. California end-use electrification impacts on carbon neutrality and clean air. Applied Energy, 2018, 213: 435-449.

17 Zhang H, Hu Z, Song Y. Power and transport nexus: Routing electric vehicles to promote renewable power integration. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3291-3301.

18 Rahimi K, Masoud D. Electric vehicles for improving resilience of distribution systems. Sustainable Cities and Society, 2018, 36: 246-256.

19 Kianmehr E, Nikkhah S, Vahidinasab V, et al. A resilience-based architecture for joint distributed energy resources allocation and hourly network reconfiguration. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(10): 5444-5455.

20 Gurz M, Baltacioglu E, Hames Y, et al. The meeting of hydrogen and automotive: A review. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(36): 23334-23346.

21 Shakeri, Nastaran, Mehdi Z, et al. Hydrogen fuel cells for ship electric propulsion: Moving toward greener ships. IEEE Electrification Magazine, 2020, 8(2), 27-43.

22 Mehrjerdi H. Off-grid solar powered charging station for electric and hydrogen vehicles including fuel cell and hydrogen storage. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(23): 11574-11583.

23 Ajanovic A, Reinhard H. Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(16): 10049-10058.

24 Chen G, Zhang H C, Hui H X, et al. Fast wasserstein-distance-based distributionally robust chance-constrained power dispatch for multi-zone HVAC systems. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4016-4028.

25 Chen, G, Yan B, Zhang H, et al. Time-efficient strategic power dispatch for district cooling systems considering the spatial-temporal evolution of cooling load uncertainties. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021: 1-11.

26 Pan M, Pan W. Knowledge, attitude and practice towards zero carbon buildings: Hong Kong case. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 122819.

27 Ye S, Wei G, Ma L P, et al. Power supply capability evaluation of DC distribution network with distributed generators. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 58-64.

28 Poudel S, Anamika D. Critical load restoration using

distributed energy resources for resilient power distribution system. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(1): 52-63.

29 Zhang S F, Philip A S, Sitao L. To what extent will China's ongoing electricity market reforms assist the integration of renewable energy?. Energy Policy, 2018, 114: 165-172.

30 Ma K, Wang C, Yang J, et al. Pricing mechanism with noncooperative game and revenue sharing contract in electricity market. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(1): 97-106.

31 Amountzias C, Hulya D, Tassos P. Pricing decisions and market power in the UK electricity market: A VECM approach. Energy Policy, 2017, 108:467-473.

32 蔡元纪, 顾宇轩, 罗钢, 等. 基于区块链的绿色证书交易平台： 概念与实践.电力系统自动化, 2020, 44(15): 1-9.
Cai Y J, Gu Y X, Luo G, et al. Blockchain based trading platform of green power certificate: Concept and practice. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 1-9. (in Chinese)

33 Kohlhepp P, Harb H, Waczowicz S, et al. Large-scale grid integration of residential thermal energy storages as demand-side flexibility resource: A review of international field studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019, 101: 527-547.

34 Hu M M, Fu X, Wang S W. Neighborhood-level coordination and negotiation techniques for managing demand-side flexibility in residential microgrids. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110248.

35 Gjorgievski V Z, Markovska N, Abazi A, et al. The potential of power-to-heat demand response to improve the flexibility of the energy system: An empirical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 138: 110489.

36 Jäger-Waldau A. Thin film photovoltaics: Markets and industry. International Journal of Photoenergy, 2012, 2012: 1-6.

37 全球能源互联网发展合作组织. 中国2060年前碳中和研究报告. (2021-03-01)[2022-04-19]. https://www.geidco.org.cn/html/pdfpreview/web/viewer. l?file=source/%E3%80%8A%E4%B8%AD%E5%9B%BD2060%E5%B9%B4%E5%89%8D%E7%A2%B3%E4%B8%AD%E5%92%8C%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%8A%A5%E5%91%8A%E3%80%8B.pdf.
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Research Report on Carbon Neutralization in China Before 2060. (2021-03-01)[2022-04-19]. https://www.geidco.org.cn/html/pdfpreview/web/viewer.html?file=source/%E3%80%8A%E4%B8%AD%E5%9B%BD2060%E5%B9%B4%E5%89%8D%E7%A2%B3%E4%B8%AD%E5%92%8C%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%8A%A5%E5%91%8A%E3%80%8B.pdf. (in Chinese)

# Typical Pathway to Carbon Neutrality for Urban Smart Energy Systems

## —Case Study of Macao Special Administrative Region

SONG Yonghua ZHANG Hongcai CHEN Ge*

( State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macao 999078, China )

**Abstract** China's ambitious goal "strive to peak carbon emissions before 2030 and achieve carbon neutrality before 2060" not only shows China's responsible attitude towards climate change, but also aligns with the upgrade requirement of China's economy and industries. Since cities occupy a dominant position in China's population, energy consumption, and carbon emissions, they are the main battlefield for achieving national carbon neutrality. This study first analyzes the challenges and requirements that cities' energy systems facing in order to realize carbon neutrality. Then, it takes Macao as an example to analyze the characteristics of cities' energy consumption and carbon emissions. Finally, it proposes a pathway to realize cities' carbon neutrality that include four major measures: promote demand-side management in cities' energy systems; encourage distributed clean energy integration; actively purchase clean electricity from outside of cities; and leverage intelligent techniques for urban energy systems operation & optimization. The proposed pathway can provide a reference for promoting the carbon neutrality for China's cities.

**Keywords** peak carbon emissions, carbon neutrality, urban energy systems, development pathway



**宋永华** 澳门大学讲座教授，智慧城市物联网国家重点实验室主任。中国电工技术学会副理事长，欧洲科学院外籍院士，英国皇家工程院院士，国际电气电子工程师学会会士。长期从事新能源电力系统与智慧能源领域的研究。获国家科技进步奖二等奖1项和何梁何利科技进步奖。E-mail: yhsong@um.edu.mo

**SONG Yonghua** Chair Professor of University of Macau, and Director of the State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City. Vice President of Chinese Electrotechnical Society, International Member of Academia Europaea, Fellow of the Royal Academy of Engineering (UK), and IEEE Fellow. He has long been engaged in renewable electrical power systems and smart energy research. He won a second prize of the National Science and Technology Progress Award, and the prize for Science and Technology Progress Award from the Ho Leung Ho Lee Foundation. E-mail: yhsong@um.edu.mo



**陈 戈** 澳门大学电机与电脑工程博士研究生。主要研究领域：城市综合能源系统调度优化。E-mail: yb97431@connect.um.edu.mo

**CHEN Ge** Ph.D. candidate of Department of Electrical and Computer Engineering in University of Macau. His research interests include operation of urban integrated energy systems. E-mail: yb97431@connect.um.edu.mo

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author